

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6518939号
(P6518939)

(45) 発行日 令和1年5月29日(2019.5.29)

(24) 登録日 令和1年5月10日(2019.5.10)

(51) Int. Cl.

G01N 23/204 (2006.01)

F I

G01N 23/204

請求項の数 10 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2015-123727 (P2015-123727)	(73) 特許権者	501204525 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術 研究所 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
(22) 出願日	平成27年6月19日(2015.6.19)	(74) 代理人	110001210 特許業務法人YK I 国際特許事務所
(65) 公開番号	特開2017-9371 (P2017-9371A)	(72) 発明者	浅見 光史 東京都三鷹市新川6丁目38番1号 国立 研究開発法人 海上技術安全研究所内
(43) 公開日	平成29年1月12日(2017.1.12)	(72) 発明者	西村 和哉 東京都三鷹市新川6丁目38番1号 国立 研究開発法人 海上技術安全研究所内
審査請求日	平成30年6月5日(2018.6.5)	審査官	蔵田 真彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コンクリート構造物の水分推定方法及びコンクリート構造物の水分推定システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときに応答をモデル化してモンテカルロ法及びSN法を含む放射線輸送計算コードにより解析する第1のステップと、

前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときに応答を実測する第2のステップと、

前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する第3のステップと
を備えることを特徴とする中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項2】

請求項1に記載の中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法であって、

前記第3のステップは、前記第1のステップにおいて複数の前記元素密度組成及び前記結合水の含有率の組み合わせであるコンクリートの種別毎に解析した前記解析された応答を記憶させたデータベースを参照して、前記実測された応答と前記調査対象であるコンクリート構造物を構成するコンクリートの種別に対して前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定することを特徴とする中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法。

10

20

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載の中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法であって、前記第 1 のステップは、

前記調査対象であるコンクリート構造物にそれぞれ検査対象領域及び周辺領域を設定してモデル化し、

前記検査対象領域を m 個の分割対象領域 k (m は 2 以上の整数、 $k = 1, \dots, m$) にメッシュ分割して、複数の前記線源の位置 i (i は 2 以上の整数) 及び複数の前記計測点の位置 j (j は 2 以上の整数) の組み合わせの各々についての前記分割対象領域 k の各々からの寄与 $r_{i,j,k}$ を求め、

前記線源の位置 i から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点の位置 j において計測されるときの前記解析された応答 $R_{i,j}$ を

【数 1】

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^m r_{i,j,k} + Ar_{i,j} \quad \dots (1)$$

(ただし、 $Ar_{i,j}$ は、前記線源の位置 i から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点の位置 j において計測されるときの前記周辺領域からの応答の寄与)

により求めることを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 4】

請求項 3 に記載のコンクリート構造物の水分推定方法であって、

前記第 1 のステップは、

前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記分割対象領域 k に前記コンクリートが体積率 100% で存在するときの寄与 $rc_{i,j,k}$ 及び、前記分割対象領域 k に前記水が体積率 100% で存在するときの寄与 $rw_{i,j,k}$ を求め、

前記第 2 のステップは、

前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答 $D_{i,j}$ を実測し、

前記第 3 のステップは、

【数 2】

$$D_{i,j} = S \left[\sum_{k=1}^m \{ (1 - \omega_k) rc_{i,j,k} + \omega_k rw_{i,j,k} \} + Ar_{i,j} \right] \quad \dots (2)$$

(ただし、 S は、前記線源の強度)

の関係を用いて前記分割対象領域 k における水分の体積率 ω_k を推定することを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 5】

請求項 4 に記載のコンクリート構造物の水分推定方法であって、

前記数式 (2) の誤差が最小となる前記分割対象領域 k における水分の体積率 ω_k を推定することを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 6】

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載のコンクリート構造物の水分推定方法であって、

前記第 3 のステップにおいて推定された前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を可視化する第 4 のステップを備えることを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 7】

10

20

30

40

50

請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載のコンクリート構造物の水分推定方法であって、
前記第 2 のステップにおいて使用される前記線源は、前記調査対象であるコンクリート構造物に対面する領域以外を中性子遮蔽手段で覆った構造を有することを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 8】

請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載のコンクリート構造物の水分推定方法であって、
前記第 2 のステップは、前記調査対象であるコンクリート構造物の表面上を前記線源及び前記計測点を順次移動させて前記実測された応答を実測することを特徴とするコンクリート構造物の水分推定方法。

【請求項 9】

コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測される際の応答をモデル化して解析した結果をデータベースとして記憶する記憶手段と、
前記線源から放射された中性子が調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測される際の応答を実測する実応答計測手段と、
前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する水分推定手段と
を備えることを特徴とする中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定システム。

【請求項 10】

請求項 9 に記載のコンクリート構造物の水分推定システムであって、
前記水分推定手段において推定された前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を可視化して表示する表示手段をさらに備えることを特徴とするコンクリート構造物の水分推定システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、コンクリート構造物の水分推定方法及びコンクリート構造物の水分推定システムに関する。

【背景技術】

【0002】

コンクリート構造物にはジャンカやひび割れ等の欠損が生ずる可能性があり、そこに水が溜まってコンクリート構造物を構成する鉄筋や構造材を腐食したり脆弱化するおそれがある。したがって、コンクリート構造物内の水分の分布を推定できる技術の実現が望まれている。

【0003】

例えば、コンクリート構造物を挟むように中性子線源とパネル型高感度中性子検出器を配置し、コンクリート構造物を透過させて中性子線源から放射された中性子を検出器によって検出することによりコンクリート構造物の欠損を検出する技術が開示されている（特許文献 1）。

【0004】

また、セメントを硬化材としてホウ素化合物等のトレーサを添加した注入剤をセメントの裏側に注入し、セメント表面側から中性子を照射してトレーサに救出された熱中性子の数を測定してセメントの注入度合を検出する技術が開示されている（特許文献 2）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開 2002 - 82073 号公報

【特許文献 2】特開平 8 - 94552 号公報

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、照射する中性子を発生させる中性子線源は、原子炉を使用する方式と加速器を使用する方式がある。透過型の中性子線検出では中性子線源とセンサとで測定対象物を挟み込む配置が必要であり、主として屋外に存在するコンクリート構造物を測定対象物とする場合には中性子線源やセンサの移動が不可能又は困難であったり、測定対象物の形状や厚みによっては背面側への配置が不可能であったりする。また、中性子線源と検出器との配置の関係において原理的にシステムが大型化してしまう。最近では屋外でも使用できる移動可能な加速器を開発している研究機関もあるが開発途上である。

【0007】

また、ホウ素化合物等をトレーサとする技術は、トレーサが添加されていない既存のコンクリート構造物には適用することが原理的に不可能である。

【0008】

本発明は、コンクリート構造物内のジャンカやひび割れ等に溜まった水分を検知するコンクリート構造物の水分推定方法及びコンクリート構造物の水分推定システムを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の請求項1に係る中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法は、コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答をモデル化してモンテカルロ法及びSN法を含む放射線輸送計算コードにより解析する第1のステップと、前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答を実測する第2のステップと、前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する第3のステップとを備えることを特徴とする。

【0010】

ここで、前記第3のステップは、前記第1のステップにおいて複数の前記元素密度組成及び前記結合水の含有率の組み合わせであるコンクリートの種別毎に解析した前記解析された応答を記憶させたデータベースを参照して、前記実測された応答と前記調査対象であるコンクリート構造物を構成するコンクリートの種別に対して前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定することが好適である。

【0011】

また、前記第1のステップは、前記調査対象であるコンクリート構造物にそれぞれ検査対象領域及び周辺領域を設定してモデル化し、前記検査対象領域をm個の分割対象領域k (mは2以上の整数、 $k = 1, \dots, m$) にメッシュ分割して、複数の前記線源の位置i (iは2以上の整数) 及び複数の前記計測点の位置j (jは2以上の整数) の組み合わせの各々についての前記分割対象領域kの各々からの寄与 $r_{i,j,k}$ を求め、前記線源の位置iから放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点の位置jにおいて計測されるときにの前記解析された応答 $R_{i,j}$ を

【数1】

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^m r_{i,j,k} + A r_{i,j} \cdots (1)$$

(ただし、 $A r_{i,j}$ は、前記線源の位置iから放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点の位置jにおいて計測されるときにの前記周辺領域からの応答の寄与)により求めることが好適である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 2 】

また、前記第 1 のステップは、前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記分割対象領域 k に前記コンクリートが体積率 100% で存在するときの寄与 $rc_{i,j,k}$ 、及び、前記分割対象領域 k に前記水が体積率 100% で存在するときの寄与 $rw_{i,j,k}$ を求め、前記第 2 のステップは、前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答 $D_{i,j}$ を実測し、前記第 3 のステップは、

【数 2】

$$D_{i,j} = S \left[\sum_{k=1}^m \{ (1 - \omega_k) rc_{i,j,k} + \omega_k rw_{i,j,k} \} + Ar_{i,j} \right] \cdots (2)$$

(ただし、 S は、前記線源の強度)

の関係を用いて前記分割対象領域 k における水分の体積率 ω_k を推定することが好適である。

【 0 0 1 3 】

また、前記数式 (2) の誤差が最小となる前記分割対象領域 k における水分の体積率 ω_k を推定することが好適である。

【 0 0 1 4 】

また、前記第 3 のステップにおいて推定された前記調査対象であるコンクリート構造物 20 内の水分の存在を可視化する第 4 のステップを備えることが好適である。

【 0 0 1 5 】

また、前記第 2 のステップにおいて使用される前記線源は、前記調査対象であるコンクリート構造物に対面する領域以外を中性子遮蔽手段で覆った構造を有することが好適である。

【 0 0 1 6 】

また、前記第 2 のステップは、前記調査対象であるコンクリート構造物の表面上を前記線源及び前記計測点を順次移動させて前記実測された応答を実測することが好適である。

【 0 0 1 7 】

本発明の請求項 9 に係る中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定システムは、コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答をモデル化して解析した結果をデータベースとして記憶する記憶手段と、前記線源から放射された中性子が調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答を実測する実応答計測手段と、前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する水分推定手段とを備えることを特徴とする。 30

【 0 0 1 8 】

ここで、前記水分推定手段において推定された前記調査対象であるコンクリート構造物 40 内の水分の存在を可視化して表示する表示手段をさらに備えることが好適である。

【発明の効果】

【 0 0 1 9 】

本発明の請求項 1 に係る中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定方法によれば、コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答をモデル化してモンテカルロ法及び SN 法を含む放射線輸送計算コードにより解析する第 1 のステップと、前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときにの応答を実測する第 2 のステップ 50

と、前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する第3のステップとを備えることによって、前記評価対象であるコンクリート構造物内の水分の分布を精度よく推定することができる。また、コンクリート構造物の一方向からの水分の存在の推定が可能となり、トレーサが不要で既存のコンクリート構造物への適用も可能となる。

【0020】

また、前記第3のステップは、前記第1のステップにおいて複数の前記元素密度組成及び前記結合水の含有率の組み合わせであるコンクリートの種別毎に解析した前記解析された応答を記憶させたデータベースを参照して、前記実測された応答と前記調査対象であるコンクリート構造物を構成するコンクリートの種別に対して前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定することによって、予め前記データベースとして登録された前記解析された応答に基づいて前記実測された応答に対応する前記コンクリート構造物内の水分の存在を推定することができる。

【0021】

また、前記第1のステップは、前記調査対象であるコンクリート構造物にそれぞれ検査対象領域及び周辺領域を設定してモデル化し、前記検査対象領域を m 個の分割対象領域 k (m は2以上の整数、 $k = 1, \dots, m$) にメッシュ分割して、複数の前記線源の位置 i (i は2以上の整数) 及び複数の前記計測点の位置 j (j は2以上の整数) の組み合わせの各々についての前記分割対象領域 k の各々からの寄与 $r_{i,j,k}$ を求め、前記線源の位置 i から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点の位置 j において計測されるときの前記解析された応答 $R_{i,j}$ を前記数式(1)により求めることにより、前記コンクリート構造物を分割した分割対象領域 k における水分の体積比を求めることができる。

【0022】

また、前記第1のステップは、前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記分割対象領域 k に前記コンクリートが体積率100%で存在するときの寄与 $r_{c,i,j,k}$ 及び、前記分割対象領域 k に前記水が体積率100%で存在するときの寄与 $r_{w,i,j,k}$ を求め、前記第2のステップは、前記線源の位置 i 及び前記計測点の位置 j の組み合わせの各々について、前記線源から放射された中性子が前記調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときに前記応答 $D_{i,j}$ を実測し、前記第3のステップは、上記数式(2)の関係を用いて前記分割対象領域 k における水分の体積率 ρ_k を推定することによって、前記寄与 $r_{c,i,j,k}$ 及び前記寄与 $r_{w,i,j,k}$ に基づいて前記分割対象領域 k における水分の体積率 ρ_k を推定することができる。

【0023】

また、前記数式(2)の誤差が最小となる前記分割対象領域 k における水分の体積率 ρ_k を推定することによって、前記数式(2)から導かれる連立方程式の完全解を解くことなく、前記寄与 $r_{c,i,j,k}$ 及び前記寄与 $r_{w,i,j,k}$ に基づいて前記分割対象領域 k における水分の体積率 ρ_k を推定することができる。

【0024】

また、前記第3のステップにおいて推定された前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を可視化する第4のステップを備えることによって、推定された水分の分布をユーザの視覚によって把握しやすい態様で表示させることができる。

【0025】

また、前記第2のステップにおいて使用される前記線源は、前記調査対象であるコンクリート構造物に対面する領域以外を中性子遮蔽手段で覆った構造を有することによって、中性子線源から前記コンクリート構造物内に入射・散乱せずに中性子検出器106に直接到達する中性子を低減することができる。

【0026】

また、前記第2のステップは、前記調査対象であるコンクリート構造物の表面上を前記

10

20

30

40

50

線源及び前記計測点を順次移動させて前記実測された応答を実測することが好適である。

【 0 0 2 7 】

本発明の請求項 9 に係る中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定システムは、コンクリートの元素密度組成及び結合水の含有量を条件として、中性子の線源の位置と計測点の位置との関係に基づいて前記線源から放射された中性子が前記コンクリートにより構成された調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときに応答をモデル化して解析した結果をデータベースとして記憶する記憶手段と、前記線源から放射された中性子が調査対象であるコンクリート構造物を介して前記計測点において計測されるときに応答を実測する実応答計測手段と、前記実測された応答と前記解析された応答とを用いて前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を推定する水分推定手段とを備えることによって、前記評価対象であるコンクリート構造物内の水分の分布を精度よく推定することができる。また、コンクリート構造物の一方向からの水分の存在の推定が可能となり、トレーサが不要で既存のコンクリート構造物への適用も可能となる。

【 0 0 2 8 】

ここで、前記水分推定手段において推定された前記調査対象であるコンクリート構造物内の水分の存在を可視化して表示する表示手段をさらに備えることによって、推定された水分の分布をユーザの視覚によって把握し易い態様で表示させることができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 9 】

【 図 1 】 本発明の実施の形態における水分推定システムの構成を示す図である。

【 図 2 】 本発明の実施の形態における水分推定装置の構成を示す図である。

【 図 3 】 本発明の実施の形態における中性子線源の構成を示す模式図である。

【 図 4 】 本発明の実施の形態における中性子の散乱モデルを示す図である。

【 図 5 】 本発明の実施の形態におけるコンクリート構造物の分割対象領域の設定例を示す図である。

【 図 6 】 本発明の実施の形態における中性子の応答を解析するときの散乱モデルを示す図である。

【 図 7 】 本発明の実施の形態における水分推定方法のフローチャートである。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 3 0 】

本発明の実施の形態における中性子を用いたコンクリート構造物の水分推定システム 100 は、図 1 に示すように、水分推定装置 102、中性子線源 104 及び中性子検出器 106 を含んで構成される。中性子線源 104 及び中性子検出器 106 は、調査対象であるコンクリート構造物 200 の同一表面側に配置されている。

【 0 0 3 1 】

水分推定装置 102 は、図 2 に示すように、一般的なコンピュータの基本構成である処理部 10、記憶部 12、入力部 14、出力部 16 及びインターフェース部 18 を含んで構成される。

【 0 0 3 2 】

処理部 10 は、CPU 等の演算手段を含み、記憶部 12 に記憶された水分推定プログラムを実行することによって水分推定装置 102 において行われるコンクリート構造物 200 内の水分の推定処理を実現する。記憶部 12 は、処理部 10 からアクセス可能に接続された半導体メモリやハードディスク等の記憶装置を含んで構成される。記憶部 12 は、水分推定プログラム、各種パラメータ、測定データ等を記憶する。入力部 14 は、キーボードやマウス等の入力装置を含んで構成される。入力部 14 は、水分推定装置 102 によって使用される各種パラメータ等の入力に用いられる。出力部 16 は、ディスプレイやプリンタ等の出力装置を含んで構成される。出力部 16 は、水分推定装置 102 において得られた処理結果を可視化して表示する表示手段として機能する。出力部 16 は、水分推定装置 102 における処理に関する情報をユーザに提示する。インターフェース部 18 は、ア

ナログ/デジタル変換器等を含んで構成される。インターフェース部 18 は、中性子検出器 106 で検出された中性子線の線量を示すデータを水分推定装置 102 に取り込むために用いられる。

【0033】

中性子線源 104 は、中性子発生管や ^{252}Cf 等の RI 線源等の中性子発生源を含んで構成される。中性子線源 104 は、図 3 の断面図に示すように、中性子発生源 20 の周りを遮蔽することが好適である。遮蔽は、調査対象物であるコンクリート構造物 200 に向く方向以外、すなわちコンクリート構造物 200 に対面する領域以外を覆うように設けられる。中性子発生源 20 を遮蔽することによって、中性子線源 104 を調査対象であるコンクリート構造物 200 の表面に設置した場合に中性子や線がコンクリート構造物 200 内に入射及び散乱せず、中性子検出器 106 に中性子や線が直接到達することを抑制することができる。

【0034】

例えば、複数種の遮蔽壁 22, 24, 26 を設けることが好適である。遮蔽壁 22 は、高速中性子を熱化させるために設けられる。遮蔽壁 22 は、例えばパラフィンを含む材料で構成される。遮蔽壁 24 は、熱化された中性子を吸収するために設けられる。遮蔽壁 24 は、カドミウムを含む材料で構成される。遮蔽壁 26 は、線を吸収するために設けられる。遮蔽壁 26 は、例えば鉛を含む材料で構成される。遮蔽壁 22 ~ 26 は、例えば、それぞれ 25 cm、1 mm、5 cm の厚さとするればよい。

【0035】

中性子検出器 106 は、中性子線源 104 から放出され、コンクリート構造物 200 によって反射又は散乱された中性子を検出する。中性子検出器 106 は、He-3 計数管、BF3 検出器等とすることができる。中性子検出器 106 は、中性子を検出すると、インターフェース部 18 を介して水分推定装置 102 へ出力する。水分推定装置 102 の処理部 10 は、中性子検出器 106 の検出信号を受けると単位時間当たりの中性子の検出数をカウントする。これにより、中性子線の線量率（計数率）が測定される。

【0036】

本実施の形態における水分推定システム 100 では、図 4 に示すように、中性子線源 104 から放射される中性子をコンクリート構造物 200 の 1 つの表面側から入射させ、コンクリート構造物 200 から反射された中性子を同一の表面側に設けた中性子検出器 106 で検出することによってコンクリート構造物 200 内の水分の分布を評価する。このため、コンクリート構造物 200 の同一表面側、すなわち一方向からの水分の分布の評価が可能となる。中性子線源 104 から発生した高速中性子は、コンクリート構造物 200 やジャンカ X 等で反射又は散乱されて中性子検出器 106 に到達する。このとき、ジャンカ X 等に水が溜まった「水溜まり」が存在すると、中性子は水内の水素によって減速され、「水溜まり」が存在しない場合に比べて熱中性子化され易くなる。この核反応の違いに着目することによってコンクリート構造物 200 内の水分の分布を評価する。水分推定システム 100 によれば、コンクリート構造物 200 の表面から中性子の数平均自由行程程度の深さまでの水分の分布を推定することができる。

【0037】

水分推定システム 100 では、図 5 に示すように、評価対象であるコンクリート構造物 200 を検査対象領域 202 とその周辺領域 204 に分けて、検査対象領域 202 内の水分の分布を評価する。このとき、検査対象領域 202 を複数（ m 個： m は 2 以上の整数）の分割対象領域 k （ k は領域番号： $k = 1, \dots, m$ ）に分割して、それぞれの分割対象領域 k 内の水分を推定することによってコンクリート構造物 200 内の水分の分布を評価する。

【0038】

図 5 の例では、コンクリート構造物 200 の一つの表面（ $X - Y$ 平面）を測定面として、測定面の検査対象領域 202 を 6 つの領域にメッシュ分割し、さらに深さ方向（ Z 方向）に 2 層に分割している。すなわち、検査対象領域 202 の測定面から遠い層は分割対象

領域 k ($1 \leq k \leq 6$) に分割され、測定面から近い層は分割対象領域 k ($7 \leq k \leq 12$) に分割されている。もちろん、検査対象領域 202 の分割数は、これに限定されるものではなく、表面内の分割数は 6 以外でもよく、深さ方向の層数も 2 以外でもよい。

【0039】

水分推定システム 100 では、コンクリート構造物 200 の測定面側の分割対象領域 k に中性子線源 104 と中性子検出器 106 を配置して応答を測定し、実測された応答に対応する水分の分布を水分推定装置 102 により解析する。すなわち、中性子線源 104 を配置した分割対象領域 k の位置 i と中性子検出器 106 を配置した分割対象領域 k の位置 j との組み合わせ毎に実際の応答 $D_{i,j}$ と解析された応答 $R_{i,j}$ とが合致する水分の分布を求める。

10

【0040】

例えば、図 5 の検査対象領域 202 において、領域番号 7 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 10, 11, 12 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{7,10}$, $D_{7,11}$, $D_{7,12}$ を測定する。また、領域番号 8 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 10, 11, 12 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{8,10}$, $D_{8,11}$, $D_{8,12}$ を測定する。また、領域番号 9 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 10, 11, 12 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{9,10}$, $D_{9,11}$, $D_{9,12}$ を測定する。さらに、中性子線源 104 の位置と中性子検出器 106 の位置を入れ替えて実際の応答を測定する。すなわち、領域番号 10 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 7, 8, 9 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{10,7}$, $D_{10,8}$, $D_{10,9}$ を測定する。また、領域番号 11 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 7, 8, 9 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{11,7}$, $D_{11,8}$, $D_{11,9}$ を測定する。また、領域番号 12 の分割対象領域に中性子線源 104 を配置すると共に、領域番号 7, 8, 9 の分割対象領域にそれぞれに中性子検出器 106 を順に配置した場合の実際の応答 $D_{12,7}$, $D_{12,8}$, $D_{12,9}$ を測定する。

20

【0041】

なお、測定時には、測定データの統計誤差が十分に小さくなるような測定時間で測定を行うことが好適である。

30

【0042】

一方、水分推定装置 102 では、放射線輸送計算コードに基づく解析を行う。水分推定装置 102 は、コンクリート構造物 200 の分割対象領域 k について 3 次元形状を扱える放射線輸送計算コード、例えば汎用コードであるモンテカルロ法に基づく MCNP や SN 法に基づく TORT 等を使用して解析する。

【0043】

例えば、中性子線源 104 の位置 i から毎秒 1 個の中性子が発生するものとし、中性子検出器 106 の位置 j で得られる応答 (計数率や線量率) は、分割対象領域 k の各領域からの寄与を領域毎に評価する必要がある。また、周辺領域 204 からの影響も考慮する必要がある。

40

【0044】

すなわち、中性子線源 104 の位置 i 及び中性子検出器 106 の位置 j とした場合の応答 $R_{i,j}$ は、数式 (3) により表わされる。

【数 3】

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^m r_{i,j,k} + Ar_{i,j} \quad \dots (3)$$

ここで、 $r_{i,j,k}$ は中性子線源104の位置*i*及び中性子検出器106の位置*j*とした場合の分割対象領域*k*からの寄与、 $A r_{i,j}$ は周辺領域204からの寄与を示す。

【0045】

コンクリート構造物200に入射した中性子の挙動は、図6に示すように、中性子線源104から反射点Aに至るまでの高速中性子の減衰と、反射点Aにおける散乱を非衝突の透過と衝突による散乱とによって表現される。

【0046】

反射点Aにおける中性子線の非衝突線束 $\Phi_A(E)$ は、数式(4)によって表現できる。ここで、 E は中性子の初期エネルギー、 S は中性子の初期強度、 P_1 は中性子線源104から反射点Aまでの距離、 $\tau(E)$ はエネルギー*E*の中性子の全断面積である。

10

【数4】

$$\Phi_A(E) = \frac{S \cdot \text{EXP}\{-P_1 \cdot \sigma_T(E)\}}{4\pi P_1^2} \dots (4)$$

【0047】

反射点Aにおける初回散乱線源 $FS(E')$ は、数式(5)によって表現できる。ここで、 $s(E, E', \theta_1, \theta_2)$ は入射エネルギー*E*から反射エネルギー*E'*にエネルギー変化し、入射角 θ_1 から反射角 θ_2 に角度変化するときの微分散乱断面積である。

【数5】

$$FS(E') = \Phi_A(E) \cdot \sigma_s(E, E', \theta_1, \theta_2) \dots (5)$$

【0048】

中性子検出器106における線束 $\Phi_B(E')$ は、数式(6)によって表現できる。ここで、 $B(E')$ はエネルギー*E'*を有する中性子が反射点Aから中性子検出器106に至る経路における散乱成分の寄与を示すビルドアップ係数、 P_2 は反射点Aから中性子検出器106までの距離、 $\tau(E')$ はエネルギー*E'*の中性子の全断面積である。

【数6】

$$\Phi_B(E') = \frac{FS(E') \cdot B(E') \cdot \text{EXP}\{-P_2 \cdot \sigma_T(E')\}}{4\pi P_2^2} \dots (6)$$

【0049】

中性子線源104の位置*i*からエネルギー*E*の中性子が放射され、各分割対象領域*k*を反射点Aとして散乱されて中性子検出器106の位置*j*にてエネルギー*E'*の中性子として検出される中性子の寄与 $r_{i,j,k}$ は、数式(6)の線束 $\Phi_B(E')$ において中性子の初期強度*S*を1にして算出することができる。すなわち、コンクリート構造物200の形状及び寸法と中性子線源104の位置*i*及び中性子検出器106の位置*j*との関係から中性子線源104から反射点A(各分割対象領域*k*)までの距離 P_1 、反射点Aから中性子検出器106までの距離 P_2 、反射点Aに対する入射角 θ_1 及び反射角 θ_2 は幾何学的に定められるので、これらの値を数式(6)に代入することにより線束 $\Phi_B(E')$ を中性子の寄与 $r_{i,j,k}$ として求めることができる。

40

【0050】

ここで、数式(4)及び数式(6)における全断面積 $\tau(E)$ 、 $\tau(E')$ はコンクリート構造物200を構成するコンクリートの元素密度組成に基づいて定められる。また、反射点Aにおける微分散乱断面積 $s(E, E', \theta_1, \theta_2)$ は、コンクリート構造物200の元素密度組成に加えてジャンカ等に溜まった水分の原子数密度に基づいて定められる。近似的には、コンクリート構造物200を構成するコンクリートの微分散乱断面積と水の微分散乱断面積をそれぞれの反射点Aにおける体積比(体積率)から定めることができる。すなわち、コンクリート構造物200を構成するコンクリート以外に相当量の水分が含まれている対象領域の微分散乱断面積は、コンクリート構造物200を構成す

50

るコンクリートの微分散乱断面積と水の微分散乱断面積にそれぞれの体積比を掛けて加算すればよい。

【0051】

そこで、反射点Aがコンクリート構造物200を構成するコンクリートである（コンクリートの体積比100%）として、コンクリート構造物200の元素密度組成に基づいて定められた反射点Aにおける微分散乱断面積 $s_c(E, E', \theta_1, \theta_2)$ を適用したときの寄与 $r_{i,j,k}$ を寄与 $rc_{i,j,k}$ として求める。また、反射点Aが水である（水の体積比100%）として、水の反射点Aにおける微分散乱断面積 $s_w(E, E', \theta_1, \theta_2)$ を適用したときの寄与 $r_{i,j,k}$ を寄与 $rw_{i,j,k}$ として求める。そして、分割対象領域kに含まれる水の体積比 ω_k を水分量とすると、中性子検出器106で計測される応答は、数式(7)で表わされる。

【数7】

$$D_{i,j} \cong S \left[\sum_{k=1}^m \{ (1 - \omega_k) \cdot rc_{i,j,k} + \omega_k \cdot rw_{i,j,k} \} + Ar_{i,j} \right] \quad \dots (7)$$

【0052】

数式(7)を展開すると数式(8)が得られる。

【数8】

$$D_{i,j} - SA r_{i,j} - S \sum_{k=1}^m rc_{i,j,k} \cong S \sum_{k=1}^m \omega_k (rw_{i,j,k} - rc_{i,j,k}) \quad \dots (8)$$

【0053】

評価対象であるコンクリート構造物200に中性子線源104及び中性子検出器106をそれぞれ位置i及び位置jに順次移動させて実測した応答 $D_{i,j}$ を数式(8)に代入することにより、未知数を水の体積比 ω_k とする連立方程式が得られる。したがって、この連立方程式を解くことにより分割対象領域kにおける水の体積比 ω_k 、すなわちコンクリート構造物200の検査対象領域202を分割した分割対象領域kの各々における水分の分布を求めることができる。

【0054】

しかしながら、寄与 $rc_{i,j,k}$ 、寄与 $rw_{i,j,k}$ 及び周辺領域204からの寄与 $Ar_{i,j}$ を算出するミュレーションには計算誤差などが含まれ、実測された応答 $D_{i,j}$ にも統計誤差等の不確かさが含まれる。したがって、数式(8)は厳密には成立しない。そこで、数式(8)の誤差が最小になるような水の体積比 ω_k を求めれば、コンクリート構造物200の分割対象領域kの水分量を推定することができる。

【0055】

例えば、最小二乗法を適用してコンクリート構造物200内の水分の分布を推定することができる。数式(8)について左辺の定数項 $C_{i,j}$ と右辺の計算値の残差Rを最小二乗法に基づく目的関数として数式(9)のように定義する。

【数9】

$$f(\omega_k) = \left(\sum_{k=1}^m \omega_k (rw_{i,j,k} - rc_{i,j,k}) - C_{i,j} \right)^2 \quad \dots (9)$$

【0056】

この目的関数を最小にするために最急降下法を適用する。制約条件として水の体積比 ω_k が0以上であるという条件を設定する。一般に数式(9)で与えられる問題を閉じた形の演算で解くことは不可能であり、何らかの繰り返し計算を行う必要がある。そこで、数式(10)となり、且つこの数列が目的関数の最小値に収束するようなベクトル列 $\omega_k^{(n)}$

10

30

40

50

$\omega_k^{(0)}, \omega_k^{(1)}, \dots, \omega_k^{(n)}$ を求めるアルゴリズムを用いる。

【数 1 0】

$$f(\omega_k^{(0)}) \geq f(\omega_k^{(1)}) \geq \dots \geq f(\omega_k^{(n)}) \geq \dots \quad (10)$$

【0057】

このアルゴリズムは一般に次の三つのステップで構成される。

(1) 適当な水の体積比 ω_k の初期点 $\omega_k^{(0)}$ を与え、繰り返し回数を表すパラメータ n を 0 とする。

(2) 現在のパラメータ n に対して得られた水の体積比 $\omega_k^{(n)}$ が数式(9)の解であるか否かの判定を行う。水の体積比 $\omega_k^{(n)}$ が判定の条件を満たせば、計算を終了して水の体積比 $\omega_k^{(n)}$ を解とする。条件を満たさなければ次のステップに進む。

(3) パラメータ n に対する計算結果を基にして、目的関数 $f(\omega_k)$ を減少させる新しい水の体積比 $\omega_k^{(n+1)}$ を求める。パラメータ n を 1 増加させてステップ(2)に戻る。

【0058】

n 回目の繰り返し計算で次の水の体積比 $\omega_k^{(n)}$ を定めるには、現在の水の体積比 $\omega_k^{(n-1)}$ からの探索方向とその方向に沿った歩み幅を決める必要がある。その結果、 $n+1$ 回目の水の体積比 $\omega_k^{(n+1)}$ は数式(11)により得られる。

【数 1 1】

$$\omega_k^{(n+1)} = \omega_k^{(n)} + \alpha_k^{(n)} p_k^{(n)} \omega_k^{(n)} \quad \dots \quad (11)$$

【0059】

ここで、 $p_k^{(n)}$ は方向を表す単位ベクトル、 $\alpha_k^{(n)}$ は歩み幅を表す正のスカラー値である。探索方向 $p_k^{(n)}$ は、数式(12)を用いた最急降下法によって求められる。

【数 1 2】

$$p_k^{(n)} = -\nabla f(\omega_k^{(n)}) \quad \dots \quad (12)$$

【0060】

このように、最小二乗法を適用して数式(8)の連立方程式の左辺と右辺との差(誤差)を最小とする水の体積比 ω_k を求める。これによって、コンクリート構造物 200 を分割した分割対象領域 k の各々における水の体積比 ω_k を推定することができる。

【0061】

水分推定装置 102 は、上記の方法により求められた水の体積比 ω_k を出力部 16 に出力する。このとき、調査対象であるコンクリート構造物 200 の検査対象領域 202 を分割対象領域 k に分割して表示し、分割対象領域 k の各々の水の体積比 ω_k を可視化して表示することが好適である。例えば、水の体積比 ω_k を 0% ~ 100% の範囲で色を変化させて表示させる等、ユーザが視覚から水の体積比 ω_k を容易に把握できるような態様で表示させることが好適である。

【0062】

具体的には、水分推定装置 102 は、図 7 に示すフローチャートに沿ってコンクリート構造物の水分推定を行う。ステップ S10 では、コンクリート構造物 200 に検査対象領域 202 及び周辺領域 204 を設定すると共に、検査対象領域 202 を分割して分割対象領域 k を設定する。ステップ S12 では、各分割対象領域 k を反射点 A として、分割対象領域 k のコンクリートの体積比が 100% である場合のパラメータを用いて中性子線源 104 の位置 i と中性子検出器 106 の位置 j の組み合わせ毎に寄与 $r_{c_{i,j,k}}$ を算出する。このとき、計算に用いられるパラメータは評価対象であるコンクリート構造物 20

10

20

40

50

0を構成するコンクリートの元素密度組成に基づいて定める。ステップS14では、各分割対象領域kを反射点Aとして、分割対象領域kの水の体積比が100%である場合のパラメータを用いて中性子線源104の位置iと中性子検出器106の位置jの組み合わせ毎に寄与 $r_{w_{i,j,k}}$ を算出する。ステップS16では、中性子線源104の位置iと中性子検出器106の位置jの組み合わせ毎に応答 $D_{i,j}$ を実測する。ステップS18では、ステップS12及びS14で解析された寄与 $r_{c_{i,j,k}}$ 及び寄与 $r_{w_{i,j,k}}$ 並びにステップS16において実測された応答 $D_{i,j}$ により表わされる数式(8)の連立方程式に基づいて最小二乗法により分割対象領域kの各々における水の体積比 ρ_k を推定する。ステップS20では、ステップS18において得られた水の体積比 ρ_k を可視化して表示する。

10

【0063】

なお、コンクリート構造物200のコンクリートの種別(コンクリートの元素密度組成)、形状及び大きさ、さらに予めコンクリート構造物200の検査対象領域202を分割した分割対象領域kの水の体積比 ρ_k を設定したときの応答 $D_{i,j}$ を解析してデータベース化しておくことも好適である。データベースは、水分推定装置102の記憶部12に記憶させておけばよい。これにより、実際に中性子線源104及び中性子検出器106を設置して実測された応答 $D_{i,j}$ とデータベースに登録されている解析された応答 $D_{i,j}$ を比較することにより、コンクリート構造物200内の水分の分布を推定することができる。

【0064】

データベースの構築に当たっては、検査対象のコンクリート構造物200の元素密度組成や結合水の含有量を予め調査してデータベース化すること、複数のコンクリート構造物の元素密度組成や結合水の含有量を予め調査してデータベース化すること、またコンクリート構造物の設計書から元素密度組成や結合水の含有量を予測してデータベース化すること等が可能である。

20

【0065】

また、上記の記載から明らかなように本実施の形態における水分推定方法においては、特にトレーサを用いずにコンクリート構造物200内の水分の分布を推定することができる。このためトレーサが添加されていない既存のコンクリート構造物に適用することが可能である。また、本実施の形態においては、中性子線源104及び中性子検出器106は、調査対象であるコンクリート構造物200の同一表面側に配置されている例を示したが、コンクリート構造物の一方向からの水分の存在の推定が可能な範囲において、同一表面側でなくてもよい。なお、コンクリート構造物200の一方向とは、コンクリート構造物200の周囲の空間を2つ以上に分けた場合の1つの側からをいう。

30

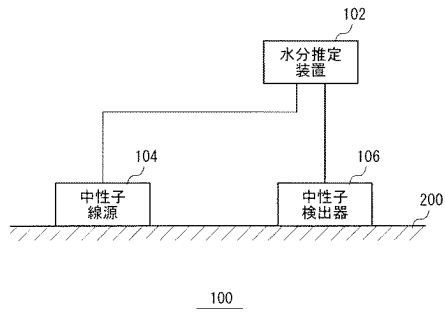
【符号の説明】

【0066】

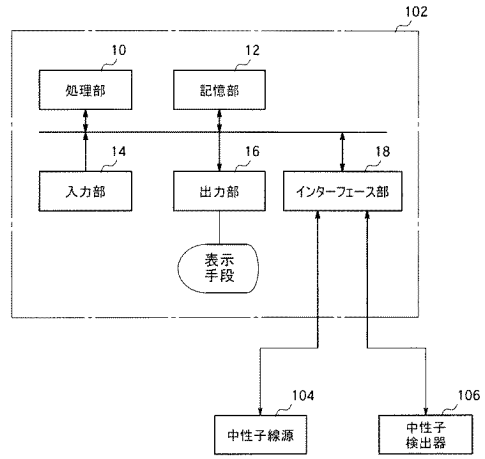
10 処理部、12 記憶部、14 入力部、16 出力部、18 インターフェース部、20 中性子発生源、22, 24, 26 遮蔽壁、100 水分推定システム、102 水分推定装置、104 中性子線源、106 中性子検出器、200 コンクリート構造物、202 検査対象領域、204 周辺領域。

40

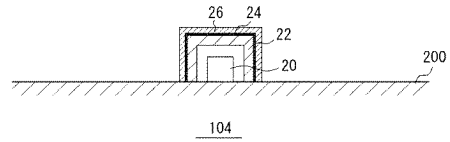
【 図 1 】



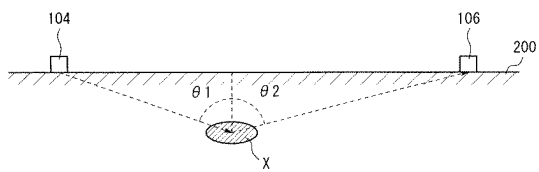
【 図 2 】



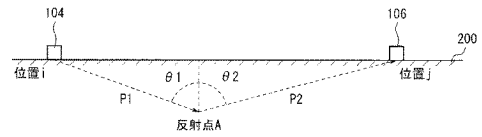
【 図 3 】



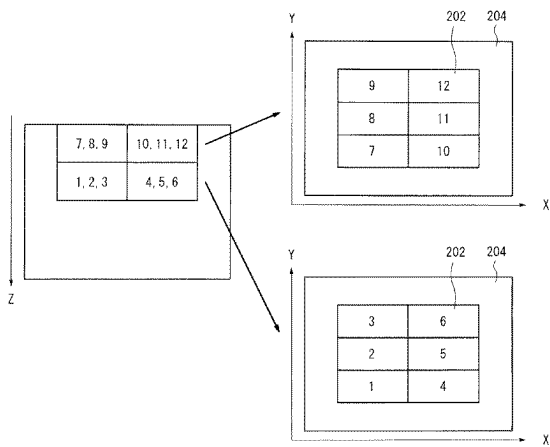
【 図 4 】



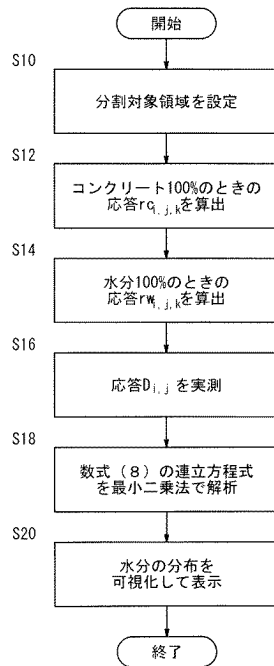
【 図 6 】



【 図 5 】



【 図 7 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭50-89094(JP,A)

特開平11-51799(JP,A)

中国特許出願公開第103336018(CN,A)

特開2006-78464(JP,A)

特開平10-48157(JP,A)

特表平07-504748(JP,A)

米国特許第05083029(US,A)

兼松学他,熱中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の給水過程の解明,日本建築学会構造系論文集,2013年 8月,Vol.78, No.690, 1339-1347

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 23/00-23/2276

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)